

ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РОЖДЕНИЯ ГИПЕРОНОВ И ГИПЕРЯДЕР В ЭКСПЕРИМЕНТЕ MPD НА УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ NICA

В. И. Колесников *, *В. А. Васендина* **, *А. И. Зинченко* ***

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Столкновения релятивистских ядер предоставляют уникальную возможность изучения фазовой диаграммы сильно взаимодействующей материи. Новые данные о выходах, спектрах и временах жизни гиперонов и гиперядер позволят раскрыть многие аспекты динамики ядро-ядерных столкновений вследствие их зависимости от характера фазовых превращений и уравнения состояния в среде, а также от вида гиперон-нуклонных потенциалов при больших плотностях. Исследование рождения странных частиц будет играть важную роль в физической программе эксперимента MPD на ускорительном комплексе NICA, поэтому изучение характеристик детектора по реконструкции гиперонов и гиперядер является важной задачей на текущем этапе реализации проекта.

Collisions of relativistic nuclei offer a unique possibility for the study of properties of the strongly interacting matter phase diagram. New data on spectra, yields and lifetimes of hyperons and hypernuclei allow unveiling many aspects of the dynamics of nucleus–nucleus interactions, due to their sensitivity to phase transformations, equation of state, as well as to hyperon–nucleon potentials in dense medium. The study of the production of strange particles plays an essential role in the MPD experiment physics programme, thus, the estimation of the detector performance for the reconstruction of hyperons and hypernuclei is a crucial task at the current stage of project realization.

PACS: 25.75.–q; 25.75.Nq; 14.20.Jn; 13.75.Ev

ВВЕДЕНИЕ

Основной целью программы с тяжелыми ионами на ускорительном комплексе NICA является исследование свойств сильно взаимодействующей материи при высокой температуре и барионной плотности [1]. В реакциях столкновения тяжелых ядер с энергиями несколько ГэВ/нуклон плотность энергии в центре области взаимодействия превышает пороговое значение для фазового перехода в состояние свободных кварков

* E-mail: kolesnik@jinr.ru

** E-mail: veron@jinr.ru

*** E-mail: Alexander.Zinchenko@jinr.ru

и глюонов — кварк-глюонную плазму (КГП) [2]. При значениях температуры в среде 150–200 МэВ рождение странных кварков становится энергетически выгодным, а с учетом динамики глюон-глюонных взаимодействий химическое равновесие по ароматам кварков может быть достигнуто в фазе КГП за промежуток времени, сравнимый со временем жизни фэйрбола [3]. Высокая плотность рожденных странных кварков в КГП должна приводить к повышенному выходу гиперонов, поэтому рождение странных частиц, включая гипероны, считается одним из наиболее перспективных индикаторов фазового перехода деконфайнмент. Повышенный выход странных адронов в столкновениях тяжелых ионов по отношению к элементарным реакциям действительно был обнаружен экспериментально в широкой области энергий столкновения [4]. Однако, несмотря на значительный объем данных о рождении гиперонов в столкновениях ядер, общепринятой интерпретации эффекта повышенного выхода странности на данный момент нет. Альтернативные объяснения данному эффекту без привлечения фазы КГП были даны в расчетах в рамках статистической термальной модели [5] или в рамках так называемого подхода *core–corona* [6], где интенсивные термодинамические параметры источника частиц (температура и бариохимический потенциал) определяются энергией и центральностью столкновения. Несмотря на значительное количество альтернативных объяснений эффекта повышенного выхода странности, считается, что если фазовый переход деконфайнмент и образование смешанной фазы адронного газа и КГП происходит в некотором диапазоне энергии и/или центральности столкновения, то это должно приводить к заметному изменению в динамике эволюции фэйрбола. Изменение в динамике реакции должно, в свою очередь, отражаться в значениях термодинамических параметров источника частиц, которые определяются в анализе выходов адронов и распределений частиц по поперечному импульсу. Изучение рождения странных частиц занимает одно из важных мест в физической программе эксперимента MPD на ускорительном комплексе NICA, а новые данные по выходам гиперонов при различных энергиях столкновения и размерах сталкивающихся систем позволят значительно расширить наши представления о динамике ядро-ядерных столкновений и свойствах плотной барионной материи.

Так как гиперядра — это ядерные системы, состоящие из нуклонов и гиперонов, процесс их образования в реакциях столкновения ядер определяется гиперон-нуклонными корреляциями в фазовом пространстве реакции и величиной нуклон-гиперонных потенциалов в плотной барионной материи [7]. Последнее обстоятельство имеет фундаментальное значение для современной астрофизики, так как появление гиперонных степеней свободы ожидается в нейтронных звездах [8], а их вклад в результирующее уравнение состояния плотной ядерной материи (и, следовательно, основных характеристик звезд) определяется величиной ΛN потенциалов. Новые экспериментальные данные по выходам, энергиям

связи и временам жизни гиперядер могут дать важную информацию о характере взаимодействий между нуклонами и гиперонами в плотной барионной материи. Область энергии ускорителя NICA является очень перспективной для таких исследований, так как в столкновениях ядер при энергиях NICA образуется материя с максимальной плотностью барионного заряда. Кроме этого, статистические термальные модели предсказывают максимум для выходов (гипер)ядер в этом диапазоне энергий [9].

Основная цель данной работы заключается в изучении характеристик детектора MPD по реконструкции гиперонов (Λ , Ξ) и гипертритона (${}^3_{\Lambda}\text{H}$) в столкновениях $\text{Bi} + \text{Bi}$ в различных интервалах по центральности столкновения.

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ДЕТЕКТОР MPD

Многофункциональный детектор MPD (MultiPurpose Detector) предназначен для реконструкции реакций столкновения тяжелых ионов на ускорительном комплексе NICA. Все подсистемы детектора (рис. 1) располагаются внутри сверхпроводящего соленоида, генерирующего аксиальное магнитное поле величиной до 0,6 Тл. Цилиндрическая время-проекционная камера TPC (Time-Projection Chamber) с системой регистрации на основе многопроволочных пропорциональных камер с падowymi считывающими элементами предназначена для измерения траекторий заряженных частиц. Импульс частицы p определяется по кривизне траектории в магнитном поле с точностью $\Delta p/p < 3\%$ в интервалах по псевдобыстроте $|\eta| < 1,5$ и поперечному импульсу $0,1 < p_T < 3$ ГэВ/с. TPC поз-

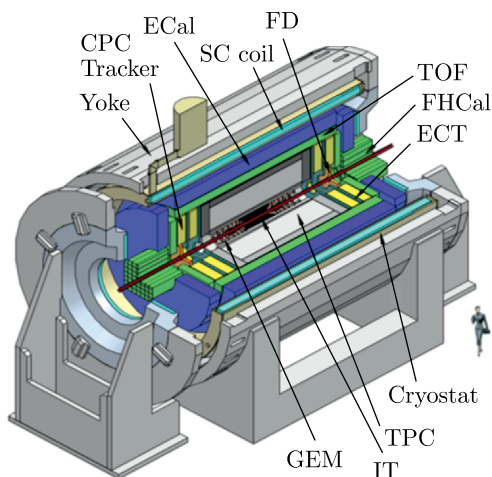


Рис. 1. Схема детектора MPD на ускорительном комплексе NICA

воляет идентифицировать частицы с помощью информации о величине ионизационных потерь dE/dx в газе, для разрешения по dE/dx порядка 8 % значение импульса для 3σ -разделения π/K и K/p составляет 0,6 и 1,0 ГэВ/с соответственно. Времяпролетная система TOF состоит из детекторных элементов типа MRPC (Multi-gap Resistive Plate Chamber), обладающих временным разрешением 60 пс. Полное временное разрешение TOF с учетом разрешения стартового детектора FD составляет 80 пс. Это позволяет провести дискриминацию π/K и K/p на уровне 3σ для частиц с импульсами до 1,2 и 2,5 ГэВ/с соответственно. Сразу после TOF расположен электромагнитный калориметр ECAL для регистрации электронов и гамма-квантов. Он состоит из 38 000 отдельных модулей, собран из слоев свинца и сцинтиллятора со светосмещающими волокнами для съема сигнала. Энергетическое разрешение ECAL для электронов с энергией 1 ГэВ равно 5 %. Передний адронный калориметр FHCAL предназначен для измерения энергии нуклонов-спектраторов, а величина энергоделиения и его азимутальное распределение позволяет определять центральность столкновения и ориентацию плоскости реакции. Более подробное описание компонентов детектора MPD можно найти в работе [10].

АНАЛИЗ ГИПЕРОНОВ И ГИПЕРЯДЕР В ЭКСПЕРИМЕНТЕ MPD

Для исследования характеристик детектора MPD по реконструкции гиперонов и гиперядер использовалась программная оболочка MPDRoot [11], которая предоставляет интерфейсы для широкого набора генераторов событий, обеспечивает методы детального геометрического описания всех элементов детектора, а также реализует процесс моделирования прохождения частиц через вещество детектора на основе программного пакета GEANT4. Кроме того, MPDRoot содержит библиотеки для описания откликов детектирующих элементов установки и для реконструкции событий. В качестве генераторов событий использовались модель UrQMD для анализа выходов гиперонов и модель RHQMD для гиперядер. В анализе моделировалось $5 \cdot 10^7$ и $4 \cdot 10^7$ событий $Bi + Bi$ при энергии столкновения $\sqrt{s_{NN}} = 9,2$ ГэВ для моделей UrQMD и RHQMD соответственно. Центральность столкновения определялась по множественности восстановленных в TPC треков в рамках приближений монте-карло-версии модели Глаубера [12]. События группировались в несколько интервалов по центральности в зависимости от множественности реконструированных в TPC частиц. В каждом событии восстановление траекторий заряженных частиц в TPC, определение значения импульса, а также нахождение первичной вершины столкновения выполнялось с помощью метода фильтра Кальмана, подробное описание используемых при реконструкции процедур можно найти в работе [11]. При экстраполяции треков на плоскости

детекторов TOF и ECAL и в случае, если экстраполяция совпадает с координатами хита в данных системах, к информации о компонентах импульса и ионизационных потерях для трека добавляются данные о времени пролета из TOF и о величине энерговыделения в ECAL. Комбинируя информацию о полном импульсе частицы, времени пролета и длине трека от вершины до точки регистрации в TOF, можно определить квадрат массы частицы. Идентификация частиц выполнялась по величине ионизационных потерь в газе TPC и по квадрату массы с TOF; сорт частицы считается определенным, если значения dE/dx и m^2 лежат в интервалах $\pm 3\sigma$ от номинальных значений, которыми являются квадрат массы покоя частицы и значение ионизационных потерь согласно распределению Бете–Блоха. На рис.2 представлены распределения dE/dx и m^2 в зависимости от величины p/q (rigidity), красными линиями показаны идентификационные области для адронов и легких ядер.

Реконструкция Λ -гиперонов проводилась по моде распада $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$. Для всех пар идентифицированных в событии пионов и протонов определялось (путем экстраполяции в вершину) положение максимального сближения траекторий, т. е. потенциальная вершина распада. Для уменьшения доли случайных комбинаций (комбинаторного фона) для всех пар применялись специально подобранные критерии отбора, называемые топологическими катами. В число этих критериев входят: а) условие по минимальному расстоянию между траекториями дочерних частиц в вершине распада — Distance of Closest Approach (DCA); б) условие по величине DCA при экстраполяции дочерних треков в основную вершину взаимодействия; в) условие по величине угла между направлением импульса гиперона и вектором, соединяющим первичную и вторичную вершины; г) ограничение по минимальному расстоянию между первичной и вторичной вершинами. Для всех отобранных пар дочерних (распадных) частиц рассчитывается инвариантная масса материнской частицы, в качестве

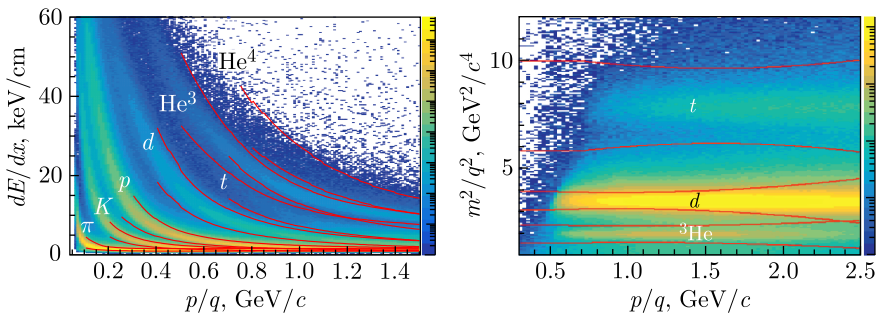


Рис. 2 (цветной в электронной версии). Зависимость ионизационных потерь dE/dx и m^2 от величины p/q . Красными линиями показаны области выделения частиц различных сортов

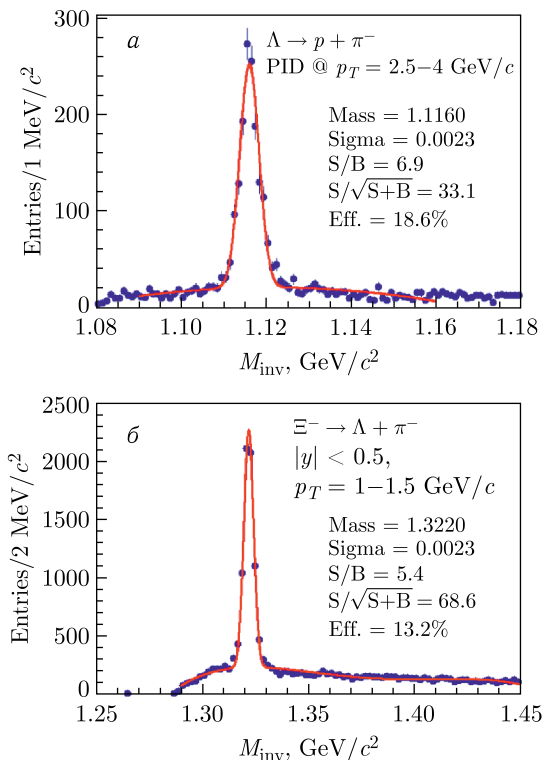


Рис. 3. а) Распределение по инвариантной массе для пар (p, π^-) . Данные показаны символами, линией показан результат фитирования суммой распределения Гаусса и полиномом. б) Распределение по инвариантной массе для пар (Λ, π^-)

примера на рис. 3, а представлены результаты анализа для интервала $2,5 < p_T < 4$ ГэВ/с. После реконструкции и селекции Λ -гиперонов в каждом событии проводился анализ для каскадного гиперона Ξ^- по моде распада $\Xi^- \rightarrow \Lambda + \pi^-$. Кандидаты Λ -гиперона для смешивания с пионами определялись по значению инвариантной массы, лежащей в интервале $\pm 5\sigma$ относительно номинального значения, а топологические критерии отбора аналогичны описанным выше критериям а)–г). На рис. 3, б показано распределение по инвариантной массе для пар (Λ, π^-) в интервале $1,0 < p_T < 1,5$ ГэВ/с. Реконструкция гипертрионов выполнялась по моде распада ${}^3\Lambda\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + \pi^-$ для пар идентифицированных ядер гелия и отрицательно заряженных пионов и с условиями отбора, аналогичным а)–г). Распределение по инвариантной массе для каждого сорта гиперона и гиперядра в каждом p_T -интервале представляет собой комбинацию истинных пар из распадов (сигнал) и случайные комбинации (фон), поэтому распределение фитировалось суммой распределения Гаусса для

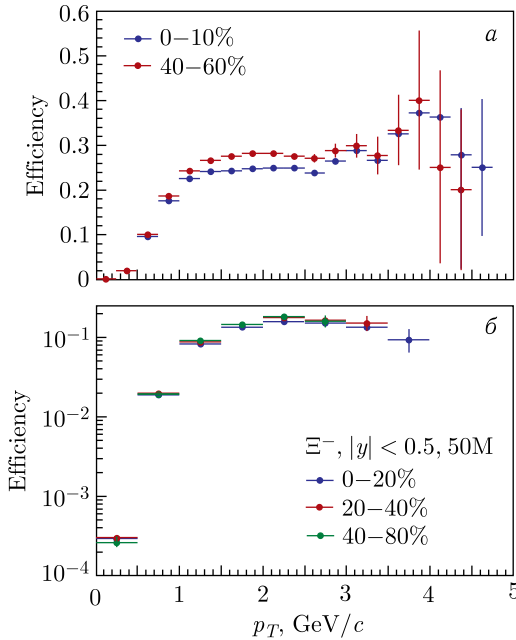


Рис. 4. а) Эффективность реконструкции Λ -гиперонов как функция поперечного импульса для двух интервалов по центральности столкновения. б) Эффективность реконструкции Ξ^- -гиперонов как функция поперечного импульса в интервалах по центральности

сигнала и полиномом для фона. Величина сигнала определялась суммированием числа отсчетов гистограммы в интервале $\pm 5\sigma$ относительно пика распределения Гаусса и вычитанием из результата интеграла функции для фона в том же интервале. Результирующее число отсчетов в каждом бине по поперечному импульсу корректировалось на полную эффективность, которая включает в себя акцептанс установки, вероятность распада по данному каналу (branching), а также учет потерь при идентификации частиц и при отборе пар частиц по топологическим каттам. На рис. 4 представлены эффективности реконструкции Λ -гиперонов (рис. а) и Ξ^- -гиперонов (рис. б) как функция поперечного импульса для нескольких интервалов по центральности столкновения.

На рис. 5, а показаны инвариантные p_T -распределения Λ -гиперонов для столкновений $\text{Bi} + \text{Bi}$ при $\sqrt{s_{NN}} = 9,2$ ГэВ. Спектры получены для интервала быстроты (в системе центра масс) $|y| < 0,5$ и всех интервалов по центральности столкновения. Реконструированные распределения показаны темными символами, светлыми показаны исходные распределения из модели. Как видно из рисунка, совпадение между реконструированными и модельными спектрами достаточно хорошее во всех бинах

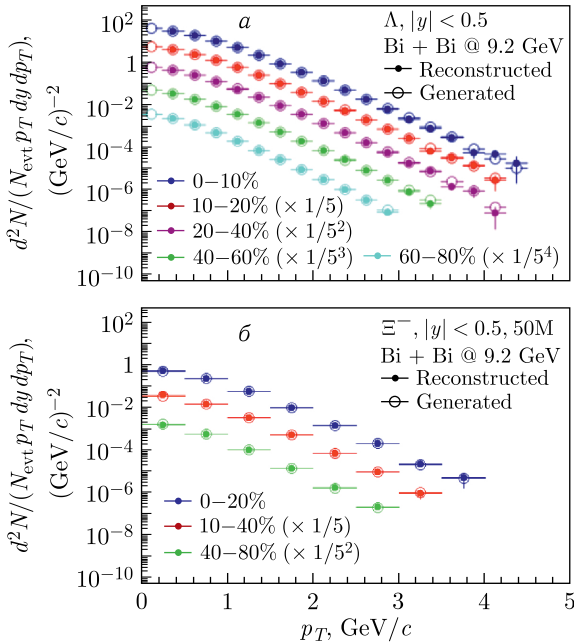


Рис. 5. а) p_T -спектры Λ -гиперонов для столкновений $\text{Bi} + \text{Bi}$ при $\sqrt{s_{NN}} = 9,2$ ГэВ для различных интервалов по центральности. Реконструированные распределения показаны темными символами, светлыми показаны исходные распределения из модели. б) p_T -спектры Ξ^- -гиперонов для различных интервалов по центральности

по центральности. На рис. 5, б представлены результаты реконструкции p_T -спектров для Ξ^- -гиперонов. Согласие между реконструированными данными и моделью также весьма хорошее.

Согласно стандартному способу определения времени жизни, выходы нестабильных частиц в интервалах по величине собственного времени τ спадают экспоненциально согласно уравнению (1) с параметром наклона τ_0 , равным времени жизни

$$N(\tau) = N(0) \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_0}\right) = N(0) \exp\left(-\frac{ML}{cp\tau_0}\right), \quad (1)$$

где $\tau = t/\gamma$ — это собственное время, $\gamma = 1/\sqrt{1 - (v/c)^2}$; v — скорость; L — распадная длина; p — полный импульс, $M = 2,991$ ГэВ/ c^2 — масса покоя гипертритона. Анализ выходов гипертрионов проводился в нескольких бинах по τ в интервале $[0,1,1,5]$ нс. В качестве примера на рис. 6, а показано распределение по инвариантной массе для пар (${}^3\text{He}, \pi^-$) в интервале $\tau = [0,1-0,3]$ нс. Скорректированное на эффективность реконструкции гипертрионов распределение для полного

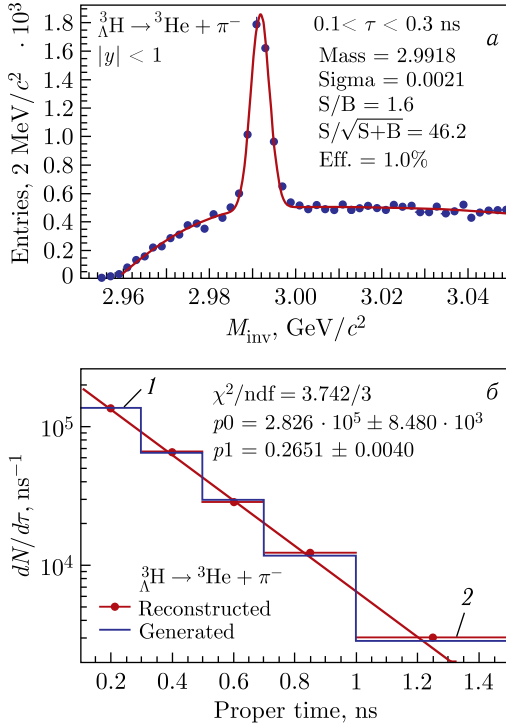


Рис. 6 (цветной в электронной версии). а) Распределение по инвариантной массе для пар (${}^3\text{He}$, π^-) в интервале $\tau = [0,1-0,3]$ нс. б) Распределение по числу зарегистрированных гипертрионов в бинах по собственному времени τ . Синяя (1) и красная (2) гистограммы представляют исходное и реконструированное распределения соответственно, линией показан фит согласно уравнению (1)

интервала представлено на рис. 6, б в виде гистограммы. Фит полученного распределения согласно уравнению (1) показан на рисунке линией. Параметр наклона $p1$ (время жизни) (265 ± 4) пс хорошо согласуется с теоретическим значением из модели, равным 263 пс. В итоге, согласно полученным на основе моделирования оценкам эффективности детектора MPD для гипертрионов и предсказаниям модели по выходам гиперядер ожидается регистрация порядка 10^3 гипертрионов за одну неделю набора данных в реакциях столкновения $\text{Vi} + \text{Vi}$ при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 9$ ГэВ и светимости $L \approx 10^{25} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Физическая программа эксперимента MPD на создаваемом ускорительном комплексе NICA направлена на изучение фазовой диаграммы сильно взаимодействующей материи в области максимального значения

барионной плотности. Многофункциональный детектор MPD ориентирован на выполнение широкой программы исследований, включая измерение выходов гиперонов и гиперядер в ядро-ядерных столкновениях. Полученные на основе реалистичного моделирования детектора результаты по реконструкции гиперонов и гиперядер демонстрируют хорошие перспективы MPD по измерению выходов странных частиц в столкновениях ядер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kekelidze V.D. et al.* Three Stages of the NICA Accelerator Complex // *Eur. Phys. J. A.* 2016. V. 52. P. 211.
2. *Ivanov Yu.B., Russkikh V.N., Toneev V.D.* Relativistic Heavy-Ion Collisions within Three-Fluid Hydrodynamics: Hadronic Scenario // *Phys. Rev. C.* 2006. V. 73. P. 044904.
3. *Koch P., Muller B., Rafelski J.* Strangeness in Relativistic Heavy Ion Collisions // *Phys. Rep.* 1986. V. 142. P. 167.
4. *Koch P., Muller B., Rafelski J.* From Strangeness Enhancement to Quark–Gluon Plasma Discovery // *Intern. J. Mod. Phys. A.* 2017. V. 32. P. 1730024–1730272.
5. *Redlich K., Tounsi A.* Strangeness Enhancement and Energy Dependence in Heavy Ion Collisions // *Eur. Phys. J. C.* 2002. V. 24. P. 589.
6. *Aichelin J., Werner K.* Centrality Dependence of Strangeness Enhancement in Ultrarelativistic Heavy Ion Collisions: A Core–Corona Effect // *Phys. Rev. C.* 2009. V. 79. P. 064907.
7. *Zhang S. et al.* Searching for Onset Deconfinement via Hypernuclei Baryon-Strangeness Correlations // *Phys. Lett. B.* 2010. V. 684. P. 224.
8. *Lattimer J.M., Prakash M.* The Physics of Neutron Stars // *Science.* 2004. V. 304. P. 536.
9. *Steinheimer J. et al.* Hypernuclei, Dibaryon and Antinuclei Production in High Energy Heavy Ion Collisions: Thermal Production vs Coalescence // *Phys. Lett. B.* 2012. V. 714. P. 85.
10. *Abgaryan V. et al.* Status and Initial Physics Performance Studies of the MPD Experiment at NICA // *Eur. Phys. J. A.* 2022. V. 58. P. 140.
11. *Gertsenberger K., Merts S., Rogachevsky O., Zinchenko A.* Simulation and Analysis Software for the NICA Experiments // *Eur. Phys. J. A.* 2016. V. 52. P. 214.
12. *Parfenov P. et al.* Relating Charged Particle Multiplicity to Impact Parameter in Heavy-Ion Collisions at NICA Energies // *Particles.* 2021. V. 4. P. 275–287.